

302/195-0  
(im Sdt erwähnt)



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 101 10 102 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**F 01 D 5/28**  
F 01 D 5/14  
B 23 P 15/02

⑲ Aktenzeichen: 101 10 102.3  
⑳ Anmeldetag: 2. 3. 2001  
㉑ Offenlegungstag: 14. 8. 2002

DE 101 10 102 A 1

⑥6 Innere Priorität:  
100 65 192. 5 18. 12. 2000

⑦1 Anmelder:  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
51147 Köln, DE

⑦4 Vertreter:  
HOEGER, STELLRECHT & PARTNER  
PATENTANWÄLTE, 70182 Stuttgart

⑦2 Erfinder:  
Kocian, Frank, Dipl.-Ing., 48165 Münster, DE

⑥5 Entgegenhaltungen:  
DE 197 51 129 C1  
DE-OS 20 42 665  
DE-OS 16 28 355  
CH-PS 1 42 542

NICKE, E.: Ein starker Verdichter, In:  
DLR-Nachrichten, Köln 6, 2000,  
Heft 97, S. 54-57;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑥4 Rotorschaukel

⑤7 Um eine Rotorschaukel in Hybrid-Bauweise mit einem Schaufelblatt und einem Schaufelfuß zu schaffen, wobei das Schaufelblatt einen ersten Schaufelblattabschnitt aus einem metallischen Werkstoff und einen zweiten Schaufelblattabschnitt aus einem Leichtbauwerkstoff umfaßt, ist vorgesehen, daß an dem zweiten Schaufelblattabschnitt eine Hinterkante der Rotorschaukel gebildet ist und daß der zweite Schaufelblattabschnitt einschnittig mit dem ersten Schaufelblattabschnitt verbunden ist.

DE 101 10 102 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft eine Rotorschaukel in Hybrid-Bauweise mit einem Schaufelblatt und einem Schaufelfuß, wobei das Schaufelblatt einen ersten Schaufelblattabschnitt aus einem metallischen Werkstoff und einen zweiten Schaufelblattabschnitt aus einem Leichtbauwerkstoff umfaßt.

[0002] Solch eine Rotorschaukel ist in der DE 197 51 129 C1 beschrieben, wobei dort das Schaufelblatt in einem Schlitz gehalten ist, welcher an einem metallischen Schaufelblattabschnitt gebildet ist.

[0003] Aus der EP 0 764 763 A1 ist eine Rotorschaukel bekannt, bei welcher in einem ersten Segment aus einem metallischen Material ein zweites Segment aus einem Verbundmaterial eingelegt ist.

[0004] In dem Artikel "Ein starker Verdichter" in den DLR-Nachrichten vom Juni 2000, Seiten 54-57 ist eine Hybridschaukel beschrieben, welche einen mit einem Kohlenfaser-Verbundwerkstoff gefertigten Teil aufweist.

[0005] Weitere Rotorschaukeln in Hybrid-Bauweise sind beispielsweise aus den DE 16 28 355, GB 2 264 755 A, US 3 883 267, DE 195 35 713 A1, DE 26 31 856 C2 oder DE 20 42 665 bekannt.

[0006] Davon ausgehend liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Rotorschaukel in Hybrid-Bauweise zu schaffen, welche einerseits eine kleine Masse aufweist und andererseits eine hohe Tragfähigkeit gegenüber Belastungen aufweist.

[0007] Diese Aufgabe wird bei der eingangs genannten Rotorschaukel erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß an dem zweiten Schaufelblattabschnitt eine Hinterkante der Rotorschaukel gebildet ist und daß der zweite Schaufelblattabschnitt einschnittig mit dem ersten Schaufelblattabschnitt verbunden ist.

[0008] Bei der Hybrid-Bauweise werden verschiedene Werkstoffe mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften miteinander kombiniert, um eine optimale Auslegung einer Rotorschaukel zu erhalten. Eine Hinterkante der Rotorschaukel hat im wesentlichen nur eine aerodynamische Funktion und kann deshalb an dem zweiten Schaufelblattabschnitt aus dem Leichtbauwerkstoff gebildet sein. Durch eine solche "leichte" Hinterkante läßt sich das Gewicht der erfindungsgemäßen Rotorschaukel minimieren.

[0009] Bei der Verbindung zweier Teile aus unterschiedlichen Materialien entstehen in Übergangsbereichen grundsätzlich mechanische Spannungen einerseits durch die Fertigung und andererseits bei Belastungen im Anwendungsfall, welche bedingt sind durch unterschiedliches Werkstoffverhalten und durch unterschiedliche physikalische und chemische Werkstoffeigenschaften, wie beispielsweise thermische Ausdehnung, Schrumpfungsprozesse bei der Polymerisation bzw. Aushärtung (Erstarrung) und unterschiedliche Steifigkeiten bzw. unterschiedliches Querkontraktionsverhalten. Dadurch, daß der zweite Schaufelblattabschnitt einschnittig mit dem ersten Schaufelblattabschnitt verbunden ist, sind hydrostatische Spannungszustände zwischen dem ersten Schaufelblattabschnitt und dem zweiten Schaufelblattabschnitt stark vermindert. Solche Spannungszustände entstehen dann, wenn ein Teil von einem zweiten Teil zumindest teilweise umschlossen und/oder umfaßt wird und dadurch dreidimensionale Zwangsbedingungen hervorgerufen werden. Insbesondere entstehen sie, wenn zwei Teile einander in der Art einer Klemmung umfassen. Durch die erfindungsgemäße einschnittige Verbindung entstehen bei der Herstellung vorzugsweise deviatorische Spannungszustände, die im Gegensatz zu hydrostatischen Spannungszuständen schon im Verlauf der Herstellung der einschnittigen

schäftigen Verbindung durch Fließvorgänge relaxiert werden können. Bei der erfindungsgemäßen Rotorschaukel treten dadurch weniger Materialprobleme auf, da ein homogener Übergang zwischen dem ersten Schaufelblattabschnitt und dem zweiten Schaufelblattabschnitt erreicht ist. Gleichzeitig läßt sich aber Masse einsparen und damit läßt sich eine Schaufelfußbelastung reduzieren.

[0010] Die Kombination einer leichten Hinterkante mit einer einschnittigen Verbindung bewirkt also, daß die Masse der Rotorschaukel reduziert ist und Materialprobleme, wie sie bei der Hybrid-Bauweise entstehen, zumindest verringert sind.

[0011] Bei dem Betrieb einer Rotorschaukel können auch starke Temperaturbelastungen entstehen, die zu einer entsprechenden thermischen Ausdehnung des Materials der Rotorschaukel führen. Bei dreidimensionalen Zwangsbedingungen kann dies zum Entstehen von Spannungen führen, welche die Belastbarkeit der Rotorschaukel beschränken. Durch die erfindungsgemäße einschnittige Verbindung, bei welcher dreidimensionale Zwangsbedingungen im wesentlichen vermieden sind, ist die durch thermische Spannungen hervorgerufene Bruchgefahr stark vermindert, da diese Spannungen sich leichter abbauen lassen bzw. nicht oder nicht in dem Maße entstehen, wie wenn dreidimensionale Zwangsbedingungen vorliegen.

[0012] Es läßt sich dann erfindungsgemäß eine Rotorschaukel schaffen, welche eine hohe Tragfähigkeit gegenüber dynamischen und quasistatischen Belastungen und gegen Impact-Belastungen wie Vogelschlag aufweist und eine verhältnismäßig geringe Masse hat.

[0013] Vorteilhafterweise ist der zweite Schaufelblattabschnitt schäftig mit dem ersten Schaufelblattabschnitt verbunden, um Materialprobleme in der Übergangszone zwischen dem ersten Schaufelblattabschnitt und dem zweiten Schaufelblattabschnitt zu vermeiden.

[0014] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn eine Vorderkante der Rotorschaukel an dem ersten Schaufelblattabschnitt gebildet ist ("schwere" Vorderkante). Ein Staupunkt der Luftströmung um die Rotorschaukel liegt an der Vorderkante. Diese ist daher stark belastet und das metallische Material des ersten Schaufelblattabschnitts sorgt für einen guten Erosionsschutz. Darüber hinaus ist auch die Gefahr des Vogelschlags stark erhöht im Bereich der Vorderkante der Rotorschaukel. Das metallische Material des ersten Schaufelblattabschnitts kann erhöhte Erosionsbeständigkeit bezüglich der Vorderkante erreichen, und andererseits läßt sich die Gesamtmasse des Schaufelblatts minimieren. Günstigerweise ist dazu in dem Vorderabschnitt eine Vorderkante der Rotorschaukel gebildet.

[0015] Vorteilhafterweise ist der zweite Schaufelblattabschnitt schäftig mit dem ersten Schaufelblattabschnitt verbunden, um Materialprobleme in der Übergangszone zwischen dem ersten Schaufelblattabschnitt und dem zweiten Schaufelblattabschnitt zu vermeiden.

[0016] Weiterhin ist es besonders günstig, wenn der zweite Schaufelblattabschnitt über den ersten Schaufelblattabschnitt in einem Hinterabschnitt hinausragt. Dadurch läßt sich die Hinterkante an dem zweiten Schaufelblattabschnitt bilden und sich so weiterhin die Masse des Schaufelblatts reduzieren und damit die Schaufelfußbelastung reduzieren. Der Hinterabschnitt ist dabei so ausgestaltet, daß er im wesentlichen nur eine aerodynamische Funktion hat und seine Kraftbelastung, insbesondere bezüglich Fliehkräften, Auftriebskräften, Erosion und Impact wie Vogelschlag gering ist oder nur eine geringe Auftretungswahrscheinlichkeit hat. Insbesondere ist in dem Hinterabschnitt die Hinterkante der Rotorschaukel gebildet.

[0017] Zur Bildung einer einschnittigen bzw. schäftigen

Fügefläche zwischen den Schaufelblattabschnitten ist es besonders günstig, wenn der zweite Schaufelblattabschnitt auf dem ersten Schaufelblattabschnitt angeordnet ist. Zudem läßt sich dadurch die erfindungsgemäße Rotorschaukel auf einfache Weise herstellen, da sich der erste Schaufelblattabschnitt getrennt von dem zweiten Schaufelblattabschnitt herstellen läßt.

[0018] Vorteilhafterweise bildet der erste Schaufelblattabschnitt eine konkave Seite der Rotorschaukel bei einer Vorderkante der Rotorschaukel. Weiterhin ist es günstig, wenn der erste Schaufelblattabschnitt eine konvexe Seite der Rotorschaukel bei einer Vorderkante der Rotorschaukel bildet. Dadurch ist die Vorderkante aus dem metallischen Material gebildet, so daß insbesondere eine gute Erosions- und Impactbeständigkeit erreicht ist.

[0019] Weiterhin ist es günstig, wenn der zweite Schaufelblattabschnitt eine konkave Seite der Rotorschaukel bei einer Hinterkante der Rotorschaukel bildet. Zusätzlich bildet der zweite Schaufelblattabschnitt eine konvexe Seite der Rotorschaukel bei einer Hinterkante der Rotorschaukel. Dadurch läßt sich die Gesamtmasse der Rotorschaukel reduzieren.

[0020] Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn der zweite Schaufelblattabschnitt einen Bereich der Rotorschaukel bildet, welcher im wesentlichen nur aerodynamische Funktionen hat. Das Material des zweiten Schaufelblattabschnitts weist einerseits eine geringere Dichte auf als das Material des ersten Schaufelblattabschnitts, um die Masse der Rotorschaukel zu erniedrigen. Andererseits kann es aber unter Umständen ein schlechteres plastisches Verhalten aufweisen und ist dann anfälliger gegen Sprödbrüche, insbesondere wenn es sich um einen keramischen Werkstoff handelt. Die Kraftbelastung sollte also in diesem Bereich gering sein. Es lassen sich an einer Rotorschaukel Bereiche ermitteln, welche eine geringe Kraftbelastung aufweisen und Bereiche ermitteln, welche eine große Kraftbelastung aufweisen. Ein solcher letztgenannter Bereich ist insbesondere der Schaufelfußbereich. Werden dann die Bereiche mit im wesentlichen nur aerodynamischen Funktionen mit dem Material des zweiten Schaufelblattabschnitts hergestellt, dann ist eine Gesamtoptimierung der Rotorschaukel erreicht.

[0021] Günstig ist es, wenn der zweite Schaufelblattabschnitt und der erste Schaufelblattabschnitt in einer Fügefläche verbunden sind, welche an einem Teilbereich des ersten Schaufelblattabschnitts gebildet ist und an einem Teilbereich des zweiten Schaufelblattabschnitts gebildet ist. Es läßt sich dadurch ein gradueller Übergang (Gradierung) zwischen den Materialien erreichen und es lassen sich so auf einfache Weise hydrostatische Spannungszustände vermeiden und deviatorische Spannungszustände je nach Material durch die Möglichkeit des Fließens bereits bei der Herstellung abbauen und sich in Folge davon die Gefahr des Materialfließens während des Betriebs vermeiden oder zumindest reduzieren.

[0022] Um eine einschnittige/schäftige Verbindung zwischen den beiden Schaufelblattabschnitten zu erreichen, sollte die Fügefläche so ausgebildet sein, daß ein Krümmungsradius wesentlich größer ist als die laterale Ausdehnung der Fügefläche und insbesondere mindestens fünfmal und vorteilhafterweise mindestens zehnmal größer ist als diese laterale Ausdehnung. Bei einer ebenen Fügefläche ist der Krümmungsradius unendlich.

[0023] Ein alternatives oder zusätzliches Kriterium für eine schäftige Ausbildung einer Fügefläche ist es, wenn die Abweichung von Normalenvektoren der Fügefläche von einem mittleren Normalenvektor der Fügefläche höchstens  $20^\circ$  ist und insbesondere kleiner als  $10^\circ$  ist. Es wird dadurch sichergestellt, daß die Fügefläche nicht zweiseitig ausge-

bildet ist. Dies dient zur Vermeidung von hydrostatischen Spannungszuständen in der Fügefläche.

[0024] Ein besonders geeignetes Kriterium für das Vorliegen einer einschnittigen/schäftigen Verbindung ist es, wenn eine Kurve, welche durch den Schnitt der Fügefläche mit einem Profilschnitt gebildet ist, in einer eindeutigen Beziehung zu der Skelettlinie des Profilschnitts steht. Eine Skelettlinie eines Profils ist definiert als die Verbindungskurve der Mittelpunkte der Kreise, welche im Profil eingeschrieben sind bzw. dieses in zwei Punkten berühren. Entsprechend ist die Skelettlinie des Profilschnitts dann die Mittelpunktskurve der Kreise, welche im zweidimensionalen Profilschnitt eingeschrieben sind. Ist die Beziehung der Schnittkurve der Fügefläche mit dem Profilschnitt relativ zu der Skelettlinie des Profilschnitts längs deren Bogenlänge eindeutig, dann läßt sich dieser Zusammenhang durch eine streng monotone Funktion darstellen. Beispielsweise wird ein entsprechender Funktionswert längs der Bogenlinie dadurch erhalten, daß auf der Normalen zur Skelettlinie innerhalb eines Profilschnitts der Ort der Schnittkurve, normiert auf die lokale Dicke an der Skelettlinie, aufgetragen wird. Nur wenn der resultierende Funktionsverlauf eindeutig ist (streng monoton), dann liegt eine einschnittige/schäftige Verbindung vor.

[0025] Vorteilhafterweise ist der Schaufelfuß mit dem ersten Schaufelblattabschnitt verbunden. Die Kraftbelastung der Rotorschaukel an dem Schaufelfuß ist maximal, da dort insbesondere die Fliehkräfte und mögliche Kraftbelastungen durch Impact maximal sind. Dadurch, daß der Schaufelfuß mit dem ersten Schaufelblattabschnitt verbunden und insbesondere einstückig an diesem gebildet ist, ist dafür gesorgt, daß das duktile isotrope Metall die Kräfte aufnehmen kann, ohne daß Versprödungsrisse eintreten, welche Sprödbruch zur Folge haben können.

[0026] Vorteilhafterweise ist der zweite Schaufelblattabschnitt außerhalb eines Anschlußbereichs des Schaufelfußes angeordnet. Auch um einen Anschlußbereich des Schaufelfußes liegt erhöhte Kraftbelastung vor. Der zweite Schaufelblattabschnitt mit dem spröden Material und der leichten Hinterkante im Vergleich zu der schwereren Vorderkante ist dann hinreichend weit entfernt von Regionen erhöhter Kraftbelastung.

[0027] Günstigerweise umfaßt die Rotorschaukel einen ersten Bereich zwischen einer konvexen Seite und einer konkaven Seite der Rotorschaukel, welcher aus dem metallischen Werkstoff gefertigt ist, einen zweiten Bereich zwischen der konvexen Seite und der konkaven Seite der Rotorschaukel, welcher aus dem Leichtbauwerkstoff gefertigt ist, und einen Übergangsbereich zwischen der konvexen Seite und der konkaven Seite der Rotorschaukel, welcher teilweise den metallischen Werkstoff und teilweise den Leichtbauwerkstoff umfaßt. In diesem Übergangsbereich erfolgt ein homogener Übergang (Gradierung) zwischen den Werkstoffen, so daß Materialprobleme dort verringert sind. Insbesondere ist es vorteilhaft, wenn in dem Übergangsbereich ein gradueller Übergang der Werkstoffe bezogen auf den Abstand zwischen konvexer Seite und konkaver Seite der Rotorschaukel stattfindet, um so einerseits die Materialprobleme im Übergangsbereich zu verringern, andererseits die Fügung zu verbessern und hydrostatische Spannungszustände zu vermeiden.

[0028] Günstig ist es, wenn der Übergangsbereich in einer Querschnittsfläche der Rotorschaukel näherungsweise linear ist. Der lineare Übergang ist dabei nur als erste Näherung zu verstehen. Bei einem solchen linearen Übergang ist die Einschnittigkeit/Schäftigkeit der Fügefläche garantiert, wobei hydrostatische Spannungszustände weitgehend vermieden sind.

[0029] Es kann aber vorgesehen sein, daß der Übergangsbereich dahingehend von der Linearität abweicht, daß im Übergangsbereich zur konkaven Seite der Rotorschaukel hin der zweite Schaufelblattabschnitt vergrößert ist. Der zweite Schaufelblattabschnitt dehnt sich dann vorzugsweise an dem der Hinterkante zugewandten Ende des Übergangsbereichs stärker als linear aus, d. h. er weist einen Bauch nach außen in den ersten Schaufelblattabschnitt hinein auf. Dadurch wird die Kompatibilität bezüglich der unterschiedlichen Materialien der beiden Schaufelblattabschnitte erhöht: Bei einem metallischen Werkstoff, wie er beim ersten Schaufelblattabschnitt zum Einsatz kommt, ist in der Regel die Schubverformbarkeit vernachlässigbar, während das Material des zweiten Schaufelblattabschnitts gegenüber einer Querverschieblichkeit weich ist. Durch den Bauch in das Metall hinein ist für ein dünnes Auslaufen desselben gesorgt, wodurch die unterschiedliche Verformungsbilder der Materialien über die geometrische Ausgestaltung des Übergangsbereichs aneinander angepaßt sind. Vorzugsweise läuft dabei der erste Schaufelblattabschnitt in einer dünnen Folie aus.

[0030] Es kann auch vorgesehen sein, daß der erste Schaufelblattabschnitt zur konvexen Seite hin im Übergangsbereich vergrößert ist, d. h. der metallische Werkstoff weist einen Bauch in Richtung der konvexen Seite der Rotorschaukel hin in den zweiten Schaufelblattabschnitt hinein auf. Der Bauch des metallischen Werkstoffs liegt dabei insbesondere in dem Bereich des Übergangsbereichs, welcher der Vorderkante näher liegt. Es lassen sich dadurch in diesem Bereich Spannungsspitzen vermeiden, da durch die geometrische Gestaltung der Fügefläche für ein "flacheres" Auslaufen gesorgt ist. Dadurch wird die Anrißempfindlichkeit in diesem Bereich verringert.

[0031] Bei einer Variante einer Ausführungsform ist es dabei vorgesehen, daß zum einen im Übergangsbereich, welcher der Vorderkante näher ist, der erste Schaufelblattabschnitt gegenüber einem linearen Verlauf vergrößert ist und in dem Bereich des Übergangsbereichs, welcher näher der Hinterkante liegt, der zweite Schaufelblattabschnitt gegenüber einem linearen Verlauf vergrößert ist. Der metallische Werkstoff erstreckt sich dann in einem Bauch im Übergangsbereich, welcher der konvexen Seite zugewandt ist, und der Leichtbauwerkstoff erstreckt sich in einem Bauch im Übergangsbereich, welcher der konkaven Seite der Rotorschaukel zugewandt ist. Eine Schnittkurve zwischen der Fügefläche und einem Profilschnitt weist dann bei dieser Variante einer Ausführungsform bezogen auf eine Gerade einen Wendepunkt auf. Bei dieser Variante ist der Übergangsbereich geometrisch so ausgestaltet, daß im Bereich, welcher der Vorderkante näher liegt, die Anrißempfindlichkeit reduziert ist, und in dem Bereich, welcher der Hinterkante näher liegt, eine bessere Kompatibilität bezüglich der unterschiedlichen Materialien hinsichtlich Schubverformungen erreicht ist.

[0032] Zur Optimierung einer erfindungsgemäßen Rotorschaukel bezüglich einerseits Belastbarkeit und andererseits Masse ist es günstig, wenn zumindest in einem dem Schaufelfuß abgewandten Bereich der erste Schaufelblattabschnitt lateral etwa 20% bis 45% der konvexen Seite der Rotorschaukel einnimmt. Weiterhin günstig ist es, wenn zumindest in einem dem Schaufelfuß abgewandten Bereich der erste Schaufelblattabschnitt lateral 50% bis 75% einer konkaven Seite der Rotorschaukel einnimmt. Insbesondere sollte der erste Schaufelblattabschnitt ca. 1/3 der konvexen Seite und ca. 2/3 der konkaven Seite einnehmen. Dadurch ist ein optimaler Übergangsbereich erzielt, durch den einerseits eine gute Fügung (Klebung) zwischen den beiden Schaufelblattabschnitten erreichbar ist und andererseits eine gute

Massenreduzierung erreichbar ist.

[0033] Als besonders vorteilhafter Werkstoff für den ersten Schaufelblattabschnitt hat sich Titan oder eine Titanverbindung erwiesen. Es kann dabei auch eine Verstärkung der Metallgrundmasse mit Fasern aus Siliziumkarbid vorgesehen sein. Diese Werkstoffe werden dann als Titanmatrix-Verbundwerkstoffe (TMC) bezeichnet. Diese weisen hervorragende Festigkeits- und Steifigkeitswerte auf.

[0034] Vorteilhafterweise ist der Werkstoff für den zweiten Schaufelblattabschnitt ein Faserverbundwerkstoff. Solche Werkstoffe weisen eine niedrige Dichte auf, d. h. sind sehr leicht. Bei einer entsprechend erfindungsgemäß ausgestalteten Rotorschaukel läßt sich die mittlere Schaufelfußbelastung beispielsweise um 20% reduzieren.

[0035] Ein besonders leichter Faserverbundstoff, welcher als Werkstoff für den zweiten Schaufelblattabschnitt geeignet ist, ist ein Kohlenfaser-Verbundwerkstoff (CFK - carbon fiber composite).

[0036] Um ein sicheres Halten des zweiten Schaufelblattabschnitts an dem ersten Schaufelblattabschnitt zu ermöglichen, sind diese miteinander verklebt. Grundsätzlich ist es denkbar, dazu ein Adhäsionsmaterial vorzusehen. Es kann aber auch vorgesehen sein, daß die Verklebung ohne einen separaten adhäsiven Werkstoff durch das Aufbringen eines Fasergeleges oder Prepreg-Materials auf ein entsprechend vorbehandeltes Metall erreichbar ist. Ist insbesondere der zweite Schaufelblattabschnitt durch ein auf den ersten Schaufelblattabschnitt gelegtes und anschließend weiterverarbeitetes Fasergelege oder Prepreg-Material gebildet, dann läßt sich dadurch eine gute und homogene Fügung erreichen. Bei einem Fasergelege erfolgt die Weiterverarbeitung durch Harztränkung innerhalb einer Form. Bei einem Prepreg-Material erfolgt die Weiterverarbeitung durch Konsolidierung und insbesondere Verpressung.

[0037] Um eine gute Verbindung zu erhalten, ist es vorteilhaft, wenn der erste Schaufelblattabschnitt in einem Überlappungsbereich eine aufgeraute Oberfläche aufweist. Dadurch läßt sich eine Kleber-Matrix-Einheit an der Fügefläche ausbilden, durch den der zweite Schaufelblattabschnitt mit dem ersten Schaufelblattabschnitt verklebt ist, ohne daß ein zusätzliches adhäsives Material vorgesehen werden muß.

[0038] Um eine sichere Verbindung zwischen den beiden Schaufelblattabschnitten zu erreichen, kann es vorgesehen sein, daß die Verbindung über die Verklebung hinaus durch Vernähung oder Vernietung verstärkt ist.

[0039] Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung einer Rotorschaukel, wie sie oben beschrieben wurde.

[0040] Es liegt dabei die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren bereitzustellen, welches die Herstellung einer bezüglich Belastung und Masse optimierten Rotorschaukel erlaubt.

[0041] Diese Aufgabe wird bei dem genannten Verfahren erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß der erste Schaufelblattabschnitt hergestellt wird, daß zur Vorbereitung des Aufbringens eines Leichtbauwerkstoffs zur Bildung des zweiten Schaufelblattabschnitts ein Oberflächenbereich des ersten Schaufelblattabschnitts bearbeitet wird und daß anschließend das Leichtbaumaterial aufgebracht wird und ein zweiter Schaufelblattabschnitt geformt wird.

[0042] Es wird also von einem vorgeformten ersten Schaufelblattabschnitt ausgegangen und an diesem dann der zweite Schaufelblattabschnitt gebildet. Dadurch läßt sich beispielsweise der erste Schaufelblattabschnitt als Teil einer Form einsetzen und außerdem ist für eine gute Fügeverbindung gesorgt.

[0043] Um eine Fügeverbindung hoher Qualität zu erhalten, ist es vorteilhaft, wenn der Oberflächenabschnitt gerei-

nigt wird. Insbesondere wird dieser fettfrei gemacht, indem beispielsweise Lösungsmittel angewandt werden.

[0044] Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der Oberflächenabschnitt aufgeraut wird. Dadurch läßt sich eine gute Verbindung zwischen Verbundwerkstoff mit seiner Matrixstruktur und der Metalloberfläche erreichen. Es kann beispielsweise vorgesehen sein, daß der Oberflächenabschnitt zur mechanischen Aufrauung sandgestrahlt wird. Es kann auch vorgesehen sein, daß der Oberflächenabschnitt mit Ultraschall bearbeitet wird.

[0045] Bei einer Variante einer Ausführungsform, bei der als Leichtbauwerkstoff insbesondere ein Duromer eingesetzt wird, wird ein Faserwerkstoff in einer Form aufgebracht und mit Harz infiltriert, welches dann aushärtet. Es kann alternativ auch ein Prepreg-Leichtbauwerkstoff eingesetzt werden, welcher vorgetränkte Gewebelagen mit Fasern in einer Matrix umfaßt.

[0046] Günstig ist es dann, wenn ein Gelege auf den Oberflächenabschnitt aufgelegt und anschließend weiterverarbeitet wird, um so einerseits den zweiten Schaufelblattabschnitt herzustellen und andererseits gleichzeitig die Fügeverbindung mit dem ersten Schaufelblattabschnitt zu bewirken. Bei dem Gelege kann es sich um ein Fasergelege handeln, bei dem die Matrixstruktur durch anschließende Harz-Imprägnierung erzeugt wird; es kann sich auch um ein Prepreg-Material handeln, welches bereits eine Matrixstruktur aufweist. Wenn das Fasergelege in einer Form aufgebracht und anschließend mit Harz imprägniert wird, läßt sich gleichzeitig die vorgegebene Form der Rotorschaukel herstellen und andererseits läßt sich die Verbindung bewirken. Die Verbindung läßt sich auch herstellen, wenn der Leichtbauwerkstoff mittels eines Prepreg-Geleges aufgebracht und nach dem Aufbringen in einer Form konsolidiert und insbesondere verpreßt wird.

[0047] Die nachfolgende Beschreibung einer bevorzugten Ausführungsform dient im Zusammenhang mit der Zeichnung der näheren Erläuterung der Erfindung. Es zeigen:

[0048] Fig. 1 eine Teilansicht eines Rotors eines Triebwerks mit Rotorschaukeln;

[0049] Fig. 2 eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Rotorschaukel in Explosionsdarstellung;

[0050] Fig. 3 (a) bis (g) Profilschnitte einer zusammengesetzten Rotorschaukel gemäß Fig. 2, beginnend von einem ersten Schaufelfuß abgewandten Ende (a) bis in den Bereich des Schaufelfußes (g);

[0051] Fig. 4 schematisch einen Profilschnitt mit einer eingezeichneten Skelettlinie und einer Schnittkurve zwischen Profilschnitt und einer Fügefläche und

[0052] Fig. 5(a) Fig. 5(b) den Verlauf zweier Varianten einer Fügefläche in jeweiliger Schnittdarstellung (Schnittkurvenverlauf).

[0053] In Fig. 1 ist in einer Ausschnittansicht ein als Ganzes mit 10 bezeichneter Rotor gezeigt, welcher einen an einer Welle fixierbaren Haltering 12 oder eine Haltescheibe umfaßt, an welchem wiederum gleichmäßig beabstandet um dessen Umfang eine Mehrzahl von Rotorschaukeln 14 angeordnet ist.

[0054] Eine Rotorschaukel 14 umfaßt, wie in Fig. 2 gezeigt, einen Schaufelfuß 16, mit dem die Rotorschaukel 14 an dem Haltering 12 fixierbar ist und ein als Ganzes mit 18 bezeichnetes Schaufelblatt. Das Schaufelblatt 18 weist eine Vorderkante 20 und eine Hinterkante 22 auf. Ein Staupunkt einer Luftströmung, welche das Schaufelblatt 18 umströmt, liegt an der Vorderkante 20.

[0055] Eine Rotorschaukel 14, wie sie in Fig. 2 gezeigt ist, ist zweistückig ausgebildet mit einem ersten Schaufelblattabschnitt 24 und einem zweiten Schaufelblattabschnitt 26. Der erste Schaufelblattabschnitt 24 ist aus einem duktilen, iso-

tropen Werkstoff gefertigt und insbesondere aus einem metallischen Werkstoff. Insbesondere ist der erste Schaufelblattabschnitt 24 aus Titan oder einer Titanverbindung gefertigt. In Frage kommt auch Titan, welches durch Fasern beispielsweise aus Siliziumkarbid verstärkt ist (Titanmatrix-Verbundwerkstoff).

[0056] Der zweite Schaufelabschnitt 26 ist aus einem Leichtbaumaterial gefertigt, welches eine geringere Dichte aufweist als das Material des ersten Schaufelblattabschnitts 24. Denkbar ist beispielsweise, daß der zweite Schaufelblattabschnitt 26 aus Aluminium gefertigt ist. Insbesondere vorteilhaft ist es, wenn der zweite Schaufelblattabschnitt 26 aus einem Faserverbundwerkstoff hergestellt ist und beispielsweise aus einem Kohlefaser-Verbundwerkstoff (CFK), welcher sehr leicht ist. Ein solches Material weist jedoch eine geringere Plastizität als ein Metall auf und ist dadurch anfälliger gegenüber Sprödbbruch.

[0057] Der Schaufelfuß 16 ist einstückig an dem ersten Schaufelblattabschnitt 24 gebildet und insbesondere ebenfalls aus dem metallischen Werkstoff wie Titan gefertigt. An ihm tritt eine maximale Belastung auf, da er den Fliehkräften der gesamten Rotorschaukel 14 standhalten muß.

[0058] Die Vorderkante 20 der Rotorschaukel 14 ist an dem ersten Schaufelblattabschnitt 24 gebildet und die Hinterkante 22 der Rotorschaukel 14 an dem zweiten Schaufelblattabschnitt 26. Die Vorderkante 20 ist damit eine "schwere" Kante und die Hinterkante 22 eine "leichte" Kante.

[0059] Der zweite Schaufelblattabschnitt 26 ist auf dem ersten Schaufelblattabschnitt 24 angeordnet, so daß ein erster Bereich 28 (Vorderabschnitt) an dem Schaufelblatt 18 gebildet ist, welcher aus dem metallischen Werkstoff besteht, und ein zweiter Bereich 30 (Hinterabschnitt) gebildet ist, welcher aus dem Leichtbauwerkstoff besteht (Fig. 3). In einem Übergangsbereich 32 findet von einer konkaven Seite 34 der Rotorschaukel 14 zu einer konvexen Seite 36 ein gradueller Übergang statt, bei dem mindestens gemittelt über den Übergangsbereich 32 die Breite des ersten Schaufelblattabschnitts 24 von der Vorderkante 20 zu der Hinterkante 22 zu hin abnimmt und entsprechend umgekehrt die Breite des zweiten Schaufelblattabschnitts 26 von der Hinterkante 22 zu der Vorderkante 20 zu hin abnimmt. Dem Übergangsbereich 32 ist eine Übergangsfläche 38 (Fügefläche) zugeordnet. (Vgl. Fig. 2, bei welcher die Übergangsfläche 38 an dem zweiten Schaufelblattabschnitt 26 sichtbar ist und an dem ersten Schaufelblattabschnitt 24 verdeckt ist).

[0060] Der Vorderabschnitt 28 des ersten Schaufelblattabschnitts 24 ragt freistehend über den zweiten Schaufelblattabschnitt 26 hinaus, und zwar zur Vorderkante 20 hin. Der Hinterabschnitt 30 des zweiten Schaufelblattabschnitts 26 ragt freistehend über den ersten Schaufelblattabschnitt 24 hinaus in Richtung der Hinterkante 22.

[0061] Der erste Schaufelblattabschnitt 24 und der zweite Schaufelblattabschnitt 26 sind einschnittig bzw. schäftig miteinander verbunden. Dadurch sind Materialprobleme, welche durch die hybride Bauweise mit einem ersten Schaufelblattabschnitt 24 und einem zweiten Schaufelblattabschnitt 26 und entsprechend unterschiedlichen Werkstoffen entstehen, verringert, da durch die Gradierung im Übergangsbereich 32 ein homogener Übergang entsteht und hydrostatische Spannungszustände, wie sie durch Klemmverbindungen entstehen (vgl. die Fig. 2 der DE 197 51 129 C1), weitgehend vermieden sind bzw. deviatorische Spannungszustände durch plastisches Fließen abbaubar sind.

[0062] Die erfindungsgemäße Rotorschaukel 14 weist dadurch statistisch eine höhere Lebensdauer und eine höhere Betriebssicherheit auf.

[0063] Der zweite Schaufelblattabschnitt 26 ist in der Art einer Fahne an dem ersten Schaufelblattabschnitt 24 angeordnet. Der zweite Schaufelblattabschnitt 26 ist dabei so dimensioniert, daß er einen Bereich der Rotorschaukel 14 bildet, welcher vorwiegend aerodynamische Funktionen hat, d. h. insbesondere nur untergeordnete strukturelle Funktionen hat. Er hat jedoch eine schwingungsdämpfende Funktion, da bei einem Faserverbundstoff als Herstellungsmaterial die Makromoleküle aufgrund der hohen inneren Reibung schwingungsdämpfend wirken.

[0064] Dadurch, daß die Vorderkante 20 der Rotorschaukel 14 aus einem metallischen Werkstoff gebildet ist, liegt dort eine gute inhärente Erosionsbeständigkeit vor. Eine grundsätzliche Gefahr für Rotorschaukeln stellt Vogelschlag dar. Dadurch kann eine bleibende Verformung entstehen, wobei der Betrieb eines Triebwerks mit einem Rotor in vorgeschriebenen Grenzen noch möglich sein muß. Eine Rotorschaukel ist dahingehend auszulegen, daß ohne Verlust eines Schaufelblatts die Energie beim Vogelschlag irreversibel durch plastische Verformung aufgenommen werden kann. Daher ist der Schaufelfuß 16 und eine konkave Seite 40 des ersten Schaufelblattabschnitts 24, welche an die Vorderkante 20 grenzt, aus dem metallischen Werkstoff gefertigt.

[0065] Andererseits kann mit dem zweiten Schaufelblattabschnitt 26 aus dem Leichtbauwerkstoff Blattmasse eingespart werden, was einer Reduktion einer Blattenergie im Betriebspunkt entspricht und weiterhin eine Reduktion einer mittleren Schaufelfußbelastung bewirkt. Zudem läßt sich ein verbessertes Strukturdämpfungsvermögen erzielen. Deshalb ist das Schaufelblatt 18 so aufgeteilt, daß in Bereichen, welche im wesentlichen nur aerodynamische Funktionen haben, der Leichtbauwerkstoff verwendet wird. Daher ist eine konkave Seite 42 des zweiten Schaufelblattabschnitts 26, welcher an die Hinterkante 22 grenzt, aus dem Leichtbauwerkstoff gefertigt. Eine konvexe Seite 44 des ersten Schaufelblattabschnitts 24 und eine konvexe Seite 46 des zweiten Schaufelblattabschnitts 26 treffen sich dann aufgrund ihrer schäftigen Verbindung und bilden gemeinsam die konvexe Seite 36 der Rotorschaukel 14 (Saugseite). Die konkave Seite 34 ist die Druckseite.

[0066] Die Dimensionierung des ersten Schaufelblattabschnitts 24 und des zweiten Schaufelblattabschnitts 26 ist dadurch bestimmt, daß zum einen der zweite Schaufelblattabschnitt 26 genügend oberhalb eines Schaufelfußanschlußbereichs 48 enden sollte, da im Schaufelfuß 16 und im Schaufelfußanschlußbereich 48 eine erhöhte Kraftbelastung auftritt. Weiterhin muß die quasistatische Tragfähigkeit gegenüber Belastungen sichergestellt werden, wobei diese Belastungen insbesondere Fliehkraftbelastungen sind und aerodynamische Auftriebskräfte. Es muß auch das Schwingungsverhalten insbesondere bezüglich Resonanzen optimiert werden, um zu starke Materialbelastungen zu vermeiden. Die Optimierung gegenüber der Gefahr von Vogelschlag wurde bereits oben erwähnt.

[0067] Bei einer Rotorschaukel 14, bei welcher der erste Schaufelblattabschnitt 24 und der zweite Schaufelblattabschnitt 26 die in Fig. 2 gezeigte Form aufweisen, wobei der erste Schaufelblattabschnitt 24 aus Titan gefertigt wurde und der zweite Schaufelblattabschnitt 26 aus einem Faserverbundwerkstoff, wurde eine ca. 16%ige Masseneinsparung erreicht, wodurch wiederum die Blattenergie im Betriebspunkt um 22% erniedrigt wurde und weiterhin die mittlere Schaufelfußbelastung um ca. 19% reduziert wurde.

[0068] Der Übergang an der schäftigen (einschnittigen) Übergangsfläche 38 ist in erster Näherung bezüglich eines Profilquerschnitts der Rotorschaukel 14 linear (siehe Fig. 3), wobei die Übergangsfläche 38 eine glatte Fläche darstellt (stetig differenzierbare Mannigfaltigkeit auf einer makro-

skopischen Skala). Es darf sich dabei kein zweischnittiger Übergang ausbilden, bei dem eine hohe Materialbelastung aufgrund hervorgerufener hydrostatischer Spannungszustände auftreten kann.

[0069] Als Kriterium für die Ausbildung einer schäftigen Fügefläche 38 (einschnittige Übergangsfläche 38) kann beispielsweise angesehen werden, daß ein mittlerer Krümmungsradius der Fügefläche 38 erheblich größer ist als eine laterale Ausdehnung der Fügefläche 38 zwischen der konkaven Seite 34 und der konvexen Seite 36. Erheblich größer bedeutet dabei mindestens fünffach und insbesondere mindestens zehnfach größer. (Bei einer ebenen Fläche ist der Krümmungsradius unendlich.) Als alternatives oder zusätzliches Kriterium kann angesetzt werden, daß die Winkelabweichung von Normalenvektoren der Übergangsfläche 38 gegenüber einem mittleren Normalenvektor höchstens 20° ist und insbesondere kleiner als 10° und vorteilhafterweise kleiner als 5° ist. Dadurch läßt sich ein gradueller Materialübergang über der Fügefläche 38 erreichen.

[0070] Ein besonders geeignetes quantitatives Kriterium bezüglich des Vorliegens einer einschnittigen/schäftigen Verbindung ist es, wie in Fig. 4 gezeigt, wenn eine Kurve 102, welche die Schnittkurve einer Fügefläche mit einem Profilschnitt 104 durch die Rotorschaukel 14 ist, in einer eindeutigen Beziehung (bijektiven Beziehung) mit einer Skelettlinie 106 des Profilschnitts 104 steht. Diese Beziehung, welche in Fig. 4 beispielhaft anhand eines ausgewählten Profilschnitts 104 gezeigt ist, muß dabei über die gesamte Fügefläche 38 gelten, d. h. für sämtliche Profilschnitte, welche eine Schnittkurve 102 mit der Fügefläche 38 enthalten.

[0071] Die Skelettlinie 106 ist definiert als diejenige Kurve, die durch die Mittelpunkte 108 der Kreise 110 gebildet ist, wobei die Kreise im Profil 112 entsprechend des Profilschnitts 104 eingeschrieben sind bzw. dieses an zwei Punkten 114, 116 berühren.

[0072] Die Bijektivität der Beziehung zwischen der Schnittkurve 102 und der Skelettlinie 106 bedeutet dabei, daß sich jedem Punkt 118 der Schnittkurve 102 eindeutig ein einziger Punkt 120 auf der Skelettlinie 106 zuordnen läßt und umgekehrt sich jedem Punkt auf der Skelettlinie 106 mindestens in einem bestimmten Bogenlängenbereich, vorgegeben durch einen Anfangspunkt 122 und einem Endpunkt 124 der Schnittkurve 102, eindeutig ein einziger Punkt auf eben der Schnittkurve 102 zuordnen läßt.

[0073] Eine solche Beziehung läßt sich über eine streng monotone Funktionsabhängigkeit zwischen jedem Punkt der Schnittkurve 102 und der Skelettlinie 106 beschreiben bzw. umgekehrt.

[0074] Beispielsweise wird dazu, ausgehend von der Schnittkurve 102, ein Funktionswert dadurch gebildet, daß die Normale 126 in Richtung der Skelettlinie 106 gefällt wird und der Funktionswert durch den Abstand zwischen der Schnittkurve 102 und der Skelettlinie 106 ermittelt wird und beispielsweise noch auf eine Dicke des Profils 112 normiert wird, wobei die Dicke senkrecht zur Skelettlinie 106 an der Schnittkurve 102 oder der Skelettlinie 106 ermittelt wird.

[0075] Eine alternative Möglichkeit zur Bestimmung der Funktion, die in der Praxis bevorzugt wird, wäre es, von der Skelettlinie 106 aus eine Normale zur Schnittkurve 102 hin zu ziehen und den Abstand zu einem Schnittpunkt dort normiert auf die Dicke als Funktionswert anzusetzen. Hier erfolgt dann die Normierung in einem besonders geeigneten weil profilbezogenen Koordinatensystem.

[0076] Der konstruierte quantitative funktionelle Zusammenhang zwischen Schnittkurve 102 und Skelettlinie 106 muß eine strenge Monotonie aufweisen.

[0077] Vorzugsweise ist der graduelle Übergang von dem zweiten Schaufelblattabschnitt 26 in den ersten Schaufelblattabschnitt 24 im Übergangsbereich 32 nur in erster Näherung linear; bei einer Variante einer Ausführungsform nimmt, wie in Fig. 5(a) gezeigt, der erste Schaufelblattabschnitt 24 erst unterproportional ab, d. h. der erste Schaufelblattabschnitt 24 ist zuerst dicker, als es einer linearen Abnahme entspricht und anschließend ist ein Bauch 150 insbesondere in Richtung einer konkaven Seite 34 des zweiten Schaufelblattabschnitts 26 ausgebildet, so daß hier der metallische Werkstoff dünner in Richtung der konkaven Seite 34 ausläuft, als es einem linearen Übergang 152 entspräche. Es liegt also zuerst eine unterproportionale und dann eine überproportionale Abnahme des metallischen Werkstoffs, wie beispielsweise Titan, vor. Ein Bereich 154 der unterproportionalen Abnahme des metallischen Werkstoffs liegt der Vorderkante 20 näher, ein Bereich 156 der überproportionalen Abnahme liegt der Hinterkante 22 näher. Da beispielsweise Titan eine geringe Schubverformbarkeit aufweist (eine hohe Schubsteifigkeit aufweist), wird durch einen Bauch 152 des Leichtbauwerkstoffs ins Titan hinein und das somit erreichte dünnere Auslaufen des Titans eine höhere Materialkompatibilität des Schaufelblatts 18 an einem Ende 158 des Übergangsbereichs 38 erzielt.

[0078] Durch das dünnere Auslaufen des Leichtbauwerkstoffs in dem Bereich 144 am anderen Ende 160 des Übergangsbereichs wird der Winkel, mit dem der erste Schaufelblattabschnitt 24 und der zweite Schaufelblattabschnitt 26 aufeinander stoßen, durch die entsprechende geometrische Ausgestaltung des Übergangsbereichs 38 verringert. Dadurch wiederum lassen sich Spannungsspitzen, die im Übergangsbereich 38 entstehen können, verringern und die Anrißempfindlichkeit der Rotorschaukel 14 läßt sich verringern.

[0079] Bei der in Fig. 5(a) gezeigten Ausführungsform weist eine Schnittkurve 162 zwischen der Übergangsfläche 38 und einem Profilschnitt aufgrund der Ausbildung der entgegengerichteten Bäuche der Bereiche 154 und 156 einen Wendepunkt 164 auf, welcher beispielsweise an oder in der Nähe des linearen Übergangs 152 liegen kann.

[0080] Bei einer anderen Variante einer Ausführungsform, welche in Fig. 5(b) gezeigt ist, bildet der Leichtbauwerkstoff bezogen auf einen linearen Übergang 166 einen Bauch 168 in den metallischen Werkstoff des ersten Schaufelblattabschnitts 24 hinein aus. Dadurch läßt sich ein dünneres Auslaufen des metallischen Werkstoffs in Richtung der Hinterkante 22 bewirken. Dadurch läßt sich bezüglich der Schubverformbarkeit die Materialkompatibilität zwischen dem Leichtbauwerkstoff des zweiten Schaufelblattabschnitts und dem metallischen Werkstoff des ersten Schaufelblattabschnitts an einem der Hinterkante 22 zugewandten Endbereich 170 der Übergangsfläche 38 erzielen.

[0081] Weiterhin ist es vorgesehen, daß außerhalb eines Anschlußbereichs 50 des zweiten Schaufelblattabschnitts 26 an dem Schaufelfuß 16, d. h. insbesondere in einem oberen Bereich des zweiten Schaufelblattabschnitts 26, der erste Schaufelblattabschnitt lateral etwa 20% bis 45% und insbesondere ca. 1/3 der konvexen Seite 36 des Schaufelblatts 18 einnimmt. Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der erste Schaufelblattabschnitt 24 lateral ca. 50% bis 75% und insbesondere ca., 2/3 der konkaven Seite 34 des Schaufelblatts 18 einnimmt. Außerhalb des Anschlußbereichs 50 nimmt dann der Übergangsbereich 32 lateral einen Bereich von ca. 25% bis 40% ein und insbesondere ca. 1/3 des Schaufelblatts 18 ein.

[0082] Der zweite Schaufelblattabschnitt 26 ist mit dem ersten Schaufelblattabschnitt 24 durch Klebung verbunden. Es kann dabei eine separate Adhäsionsschicht vorgesehen

sein. Insbesondere ist aber die Klebung mittels dem Faserverbundwerkstoff für den zweiten Schaufelblattabschnitt 26 bei der Herstellung gebildet, ohne daß ein getrennter Klebstoff vorgesehen werden muß.

[0083] Die Verbindung kann noch zusätzlich dadurch verstärkt sein, daß der zweite Schaufelblattabschnitt 26 und der erste Schaufelblattabschnitt 24 durch Vernähung oder Vernietung zusätzlich aneinander fixiert werden (in der Zeichnung nicht gezeigt).

[0084] Eine erfindungsgemäße Rotorschaukel 14 läßt sich nun wie folgt herstellen:

Der erste Schaufelblattabschnitt 24 wird aus dem metallischen Werkstoff vollständig hergestellt. Die an ihm gebildete Übergangsfläche zur Verbindung mit dem zweiten Schaufelblattabschnitt 26 wird insbesondere durch mechanische Bearbeitung wie Sandstrahlen oder durch Ultraschallbearbeitung aufgeraut, um die Verbindungsfähigkeit dieses Oberflächenabschnitts mit einem Faserverbundwerkstoff zu erhöhen. Die Oberfläche in diesem Bereich wird dann beispielsweise mittels Ultraschall gereinigt und insbesondere mittels Lösungsmitteln fettfrei gemacht. In einer Form, welche zur Bildung der Gesamtform des Schaufelblattabschnitts 18 dient, wird dann ein Faserverbundwerkstoff auf die Übergangsfläche 38 aufgelegt und mit dem ersten Schaufelblattabschnitt 24 verpreßt. Der erste Schaufelblattabschnitt 24 ist dann gewissermaßen selber ein Teil der Form.

[0085] Es kann auch vorgesehen sein, daß ein Fasergelege in der Form ausgelegt wird und dann mit Kunstharz wie einem Epoxidharz vergossen wird. Letzteres wird besonders dann angewandt, wenn die Matrix des Faserverbundwerkstoffs durch ein Duromer gebildet ist.

[0086] Es kann weiterhin auch ein Prepreg-Werkstoff verwendet werden, welcher ein vorgetränktes Material mit in eine Matrix eingebetteten Fasern umfaßt. Bei der Matrix kann es sich beispielsweise um ein Duromer oder ein Thermoplast handeln.

[0087] Durch das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung einer Rotorschaukel wird in dem Übergangsbereich 32 eine Kleber-Matrix-Einheit gebildet, welche das Fasergelege an die Metalloberfläche des ersten Schaufelblattabschnitts 24 bindet.

#### Patentansprüche

1. Rotorschaukel in Hybrid-Bauweise mit einem Schaufelblatt (18) und einem Schaufelfuß (16), wobei das Schaufelblatt (18) einen ersten Schaufelblattabschnitt (24) aus einem metallischen Werkstoff und einen zweiten Schaufelblattabschnitt (26) aus einem Leichtbauwerkstoff umfaßt, dadurch gekennzeichnet, daß an dem zweiten Schaufelblattabschnitt (26) eine Hinterkante (22) der Rotorschaukel (14) gebildet ist und daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) einschneitig mit dem ersten Schaufelblattabschnitt (24) verbunden ist.
2. Rotorschaukel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) schäftig mit dem ersten Schaufelblattabschnitt (24) verbunden ist.
3. Rotorschaukel nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine Vorderkante (20) der Rotorschaukel (14) an dem ersten Schaufelblattabschnitt (24) gebildet ist.
4. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Schaufelblattabschnitt (24) über den zweiten Schaufelblattabschnitt (26) in einem Vorderabschnitt (28) hinaus-

- ragt.
5. Rotorschaukel nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß in dem Vorderabschnitt (28) eine Vorderkante (20) der Rotorschaukel (14) gebildet ist.
6. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) über den ersten Schaufelblattabschnitt (24) in einem Hinterabschnitt (30) hinausragt.
7. Rotorschaukel nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß in dem Hinterabschnitt (30) die Hinterkante (22) der Rotorschaukel (14) gebildet ist.
8. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) auf dem ersten Schaufelblattabschnitt (24) angeordnet ist.
9. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Schaufelblattabschnitt (24) eine konkave Seite (40) der Rotorschaukel (14) bei einer Vorderkante (20) der Rotorschaukel (14) bildet.
10. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Schaufelblattabschnitt (24) eine konvexe Seite (44) der Rotorschaukel (14) bei einer Vorderkante (20) der Rotorschaukel (14) bildet.
11. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) eine konkave Seite (42) der Rotorschaukel (14) bei einer Hinterkante (22) der Rotorschaukel (14) bildet.
12. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) eine konvexe Seite (46) der Rotorschaukel (14) bei einer Hinterkante (22) der Rotorschaukel (14) bildet.
13. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) einen Bereich der Rotorschaukel (14) bildet, welcher vorwiegend aerodynamische Funktionen hat.
14. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) und der erste Schaufelblattabschnitt (24) in einer Fügefläche (38) verbunden sind, welche an einem Teilbereich des ersten Schaufelblattabschnitts (24) gebildet ist und an einem Teilbereich des zweiten Schaufelblattabschnitts (26) gebildet ist.
15. Rotorschaukel nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Fügefläche (38) so ausgebildet ist, daß ein Krümmungsradius wesentlich größer ist als die laterale Ausdehnung der Fügefläche (38).
16. Rotorschaukel nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Abweichung von Normalenvektoren der Fügefläche (38) von einem mittleren Normalenvektor der Fügefläche (38) höchstens 20° ist.
17. Rotorschaukel nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß eine Kurve (102), welche durch den Schnitt der Fügefläche (38) mit einem Profilschnitt (104) gebildet ist, in einer eindeutigen Beziehung zu der Skelettlinie (106) des Profilschnitts (104) steht.
18. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Schaufelfuß (16) mit dem ersten Schaufelblattabschnitt (24) verbunden ist.
19. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Schaufelfuß

- (16) einstückig an dem ersten Schaufelblattabschnitt (24) gebildet ist.
20. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) außerhalb eines Anschlußbereichs (48, 50) des Schaufelfußes (16) angeordnet ist.
21. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen ersten Bereich (28) zwischen einer konvexen Seite (36) und einer konkaven Seite (34) der Rotorschaukel (14), welcher aus dem metallischen Werkstoff hergestellt ist, einem zweiten Bereich (30) zwischen der konvexen Seite (36) und der konkaven Seite (34) der Rotorschaukel (14), welcher aus dem Leichtbauwerkstoff hergestellt ist, und einen Übergangsbereich (32) zwischen der konvexen Seite (36) und der konkaven Seite (34) der Rotorschaukel (14), welcher teilweise den metallischen Werkstoff und teilweise den Leichtbauwerkstoff umfaßt.
22. Rotorschaukel nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß in dem Übergangsbereich (32) ein gradueller Übergang des Werkstoffs bezogen auf den Abstand zwischen konvexer Seite (36) und konkaver Seite (34) der Rotorschaukel (14) stattfindet.
23. Rotorschaukel nach Anspruch 22 oder 21, dadurch gekennzeichnet, daß der Übergang im Übergangsbereich (32) in einer Querschnittsfläche der Rotorschaukel (14) näherungsweise linear ist.
24. Rotorschaukel nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß der Übergang im Übergangsbereich (32) dahingehend von der Linearität abweicht, daß zur konkaven Seite (34) der Rotorschaukel (14) zu der zweiten Schaufelblattabschnitt (26) vergrößert ist.
25. Rotorschaukel nach Anspruch 23 oder 24, dadurch gekennzeichnet, daß der Übergang im Übergangsbereich (32) dahingehend von der Linearität abweicht, daß zur konvexen Seite (36) der Rotorschaukel (14) zu der ersten Schaufelblattabschnitt (24) vergrößert ist.
26. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest in einem vom Schaufelfuß (16) entfernten Bereich der erste Schaufelblattabschnitt (24) lateral etwa 20% bis 45% einer konvexen Seite (36) der Rotorschaukel (14) einnimmt.
27. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest in einem vom Schaufelfuß (16) entfernten Bereich der erste Schaufelblattabschnitt (24) lateral 50% bis 75% einer konkaven Seite (34) der Rotorschaukel (14) einnimmt.
28. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Werkstoff für den ersten Schaufelblattabschnitt (24) Titan oder eine Titanverbindung ist.
29. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Werkstoff für den zweiten Schaufelblattabschnitt (26) ein Faser-verbundwerkstoff ist.
30. Rotorschaukel nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, daß der Werkstoff für den zweiten Schaufelblattabschnitt (26) ein Kohlefaser-Verbundwerkstoff ist.
31. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Schaufelblattabschnitt (26) mit dem ersten Schaufelblattabschnitt (24) verklebt ist.
32. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite



Schaufelblattabschnitt (26) durch ein auf den ersten Schaufelblattabschnitt (24) gelegtes und anschließend weiterverarbeitetes Fasergelege oder Prepreg-Material gebildet ist.

33. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Verbindung mit dem zweiten Schaufelblattabschnitt (26) der erste Schaufelblattabschnitt (24) in einem Überlappungsbereich eine aufgeraute Oberfläche aufweist.

34. Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Verbindung zwischen erstem Schaufelblattabschnitt (24) und zweitem Schaufelblattabschnitt (26) durch Vernähung oder Vernietung verstärkt ist.

35. Verfahren zur Herstellung einer Rotorschaukel nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Schaufelblattabschnitt hergestellt wird, daß zur Vorbereitung des Aufbringens eines Leichtbauwerkstoffs zur Bildung des zweiten Schaufelblattabschnitts ein Oberflächenbereich des ersten Schaufelblattabschnitts bearbeitet wird und daß anschließend das Leichtbaumaterial aufgebracht wird und ein zweiter Schaufelblattabschnitt geformt wird.

36. Verfahren nach Anspruch 35, dadurch gekennzeichnet, daß der Oberflächenabschnitt gereinigt wird.

37. Verfahren nach Anspruch 35 oder 36, dadurch gekennzeichnet, daß der Oberflächenabschnitt aufgeraut wird.

38. Verfahren nach Anspruch 37, dadurch gekennzeichnet, daß der Oberflächenabschnitt sandgestrahlt wird.

39. Verfahren nach Anspruch 37 oder 38, dadurch gekennzeichnet, daß der Oberflächenabschnitt mit Ultraschall gereinigt und/oder bearbeitet wird.

40. Verfahren nach einem der Ansprüche 35 bis 39, dadurch gekennzeichnet, daß ein Gelege auf den Oberflächenabschnitt aufgebracht und anschließend weiterverarbeitet wird.

41. Verfahren nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, daß ein Fasergelege in einer Form aufgebracht und anschließend mit Harz imprägniert wird.

42. Verfahren nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, daß der Leichtbauwerkstoff mittels eines Prepreg-Geleges aufgebracht wird.

43. Verfahren nach Anspruch 42, dadurch gekennzeichnet, daß das Prepreg-Gelege nach dem Aufbringen konsolidiert wird.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65

FIG.1

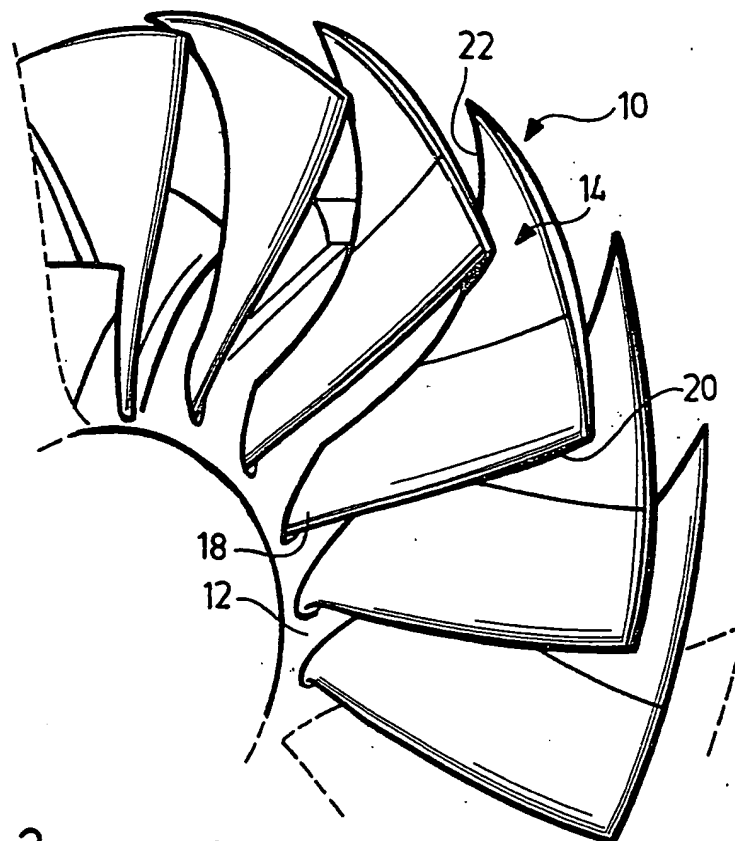


FIG. 2

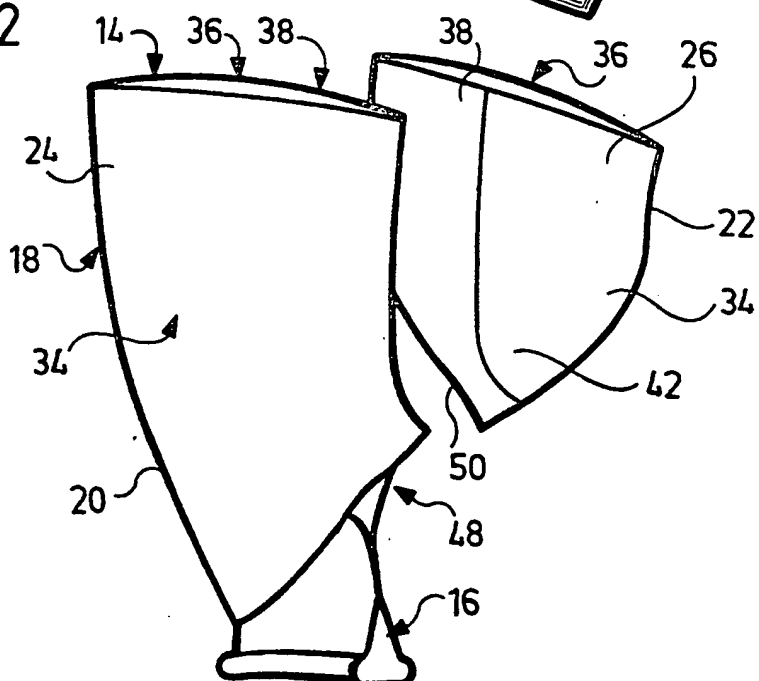


FIG. 3a

FIG. 3b

FIG. 3c

FIG. 3d

FIG. 3e

FIG. 3f

FIG. 3g

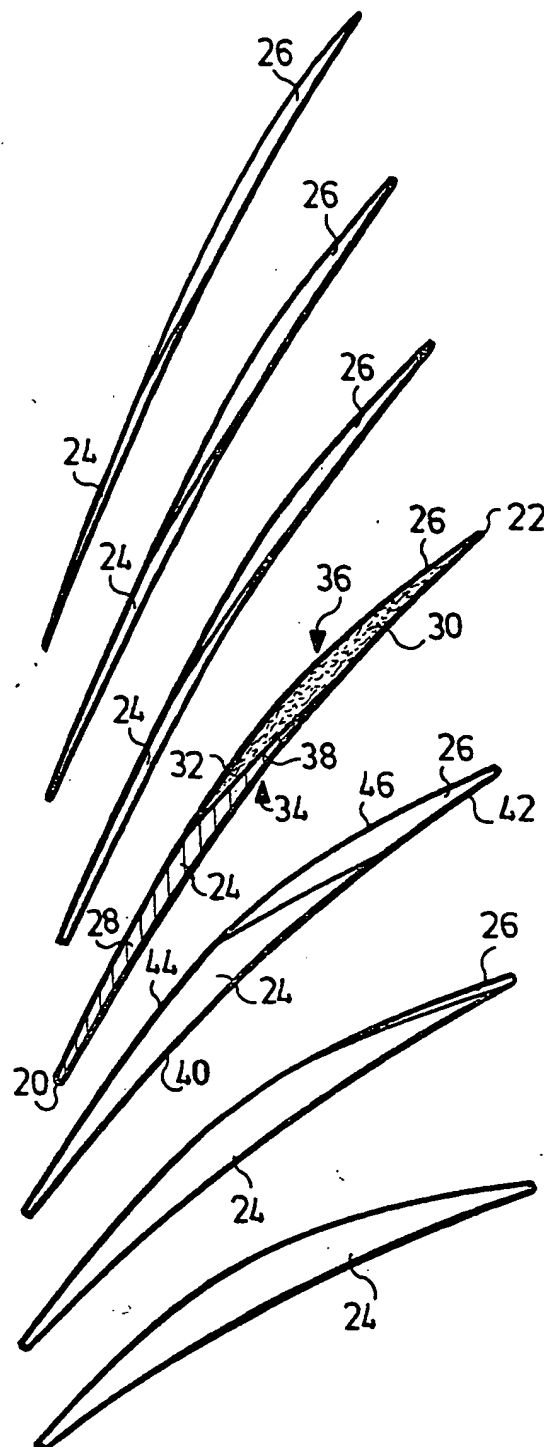


FIG.4

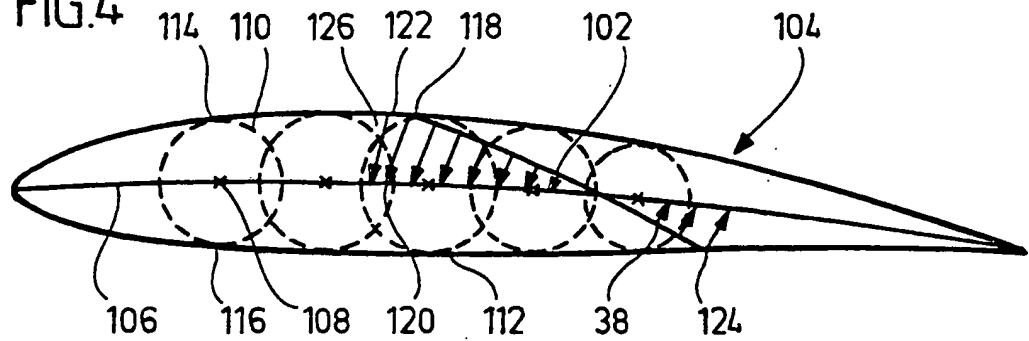


FIG.5a

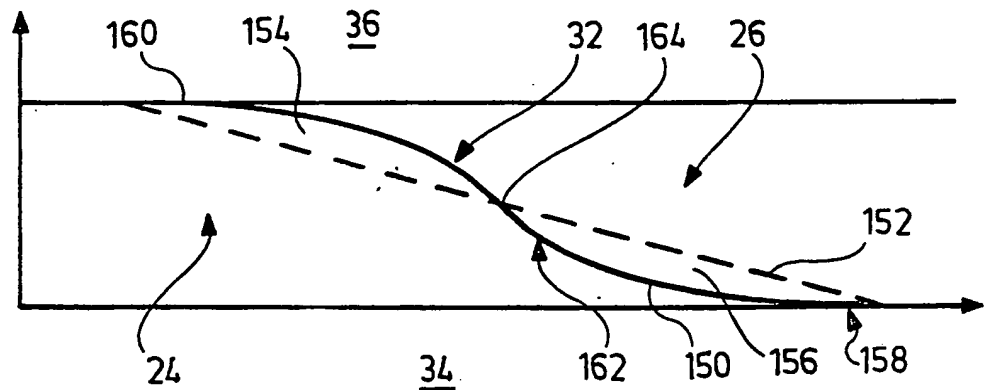


FIG.5b

